韓國海岸·海洋工學會誌
第 13 券 第 1 號, pp. 56~60, 2001年 3月

천해조가 발달된 하구에서의 조석파 전파특성
Tidal Propagation Characteristics in the Estuary which shows Significant Shallow Tides

강주환* · 문승록*
Ju Whan Kang* and Seung Rok Moon*

要 旨 : 하구입구에서 형성된 조석비대칭 현상은 천해조의 성장에 따라 상류방향으로 갈수록 더욱 심화되는 경향이 있다. 따라서 이러한 해역에서의 유사이동 또는 오염확산 등과 관련된 연구를 수행할 경우 천해조에 대한 면밀한 관찰과 세심한 적용이 요구된다. 본 연구의 목적은 다양한 수치실험을 통해 천해조의 발생 및 전파에 관한 제반 특성을 밝혀내는데 있으며, 특히 조간대가 조석파의 전파와 천해조 발생에 미치는 영향성에 대하여 중점적으로 연구하였다. 이와 같은 연구를 통해 하구의 지형학적 특성에 따른 조석파의 거동이 규명되면 향후 대규모 토목사업 시행시 천해조를 포함한 조석환경의 변화와 그에 따른 유사 및 오염물질 이동에 관한 정성적인 분석과 더불어 해당해역에서의 조석에 관한 수치모형 설계에도 지침이 될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 하구, 조석파의 전파, 조석비대칭, 창·낙조우세

Abstract □ Tidal asymmetry which is generated at the mouth of an estuary tends to be more serious toward the upper stream due to the growth of shallow tides. Thus careful observations and applications for the shallow tides are needed if studies related to sediment or pollutant transport are carried on. An aim of the present study was to clarify the characteristics of generation and propagation of shallow tides by various numerical experiments including the effect of inter-tidal zone. The results of the present study will give a fundamental guide for the analysis of tidal environmental changes and for the design of a numerical model if coastal constructions are conducted.

Keywords : Estuary, Propagation of tidal wave, Tidal asymmetry, Flood/Ebb dominance

1. 서 론

감조하천을 포함한 대부분의 하구 부근은 지형의 복잡성과 함께 수심의 변화가 심하여 천해조의 발달이 두드러지는 경향이 있다. 이러한 해역에서의 해수유동은 천해조의 영향을 크게 받게 되므로 창조시와 낙조시의 최대조류속에 차이가 발생하는 조석비대칭 현상을 유발하게 된다. 특히 목포해역과 같이 주변에 도서가 산재해 있고 수심이 복잡한 해역에서는 M_2 분조 진폭에 대한 M_4 분조 진폭의 비율인 진폭비가 20% 가까이 되어 낙조지속시간이 창조지속시간의 60% 정도에 불과해 매우 심한 낙조우세를 보이는 지점도 있다(강주환 등, 1998; Kang, 1999). 이는 대부분의 감조하천에서 마찰에 의한 조석왜곡에 따라 창조우세를 보이는 일반적 경향과는 상반된 것이다. 따라서 천해조가 발달된 하구라 하더라도 어떠한 지형적 요인에 의해 창조우세 또는 낙조우세가 유발되는지에 대한 근본적인 이해를 위해서는 천해조 발생 및 성장기구에 대한 연구가 필요한 것이다. 하상에서 소류사의 움직임은 토사의 크기가 큰 경우 유속의 1.5승에서부터 가는 모래의 경우 유속의 6승에 비례한다고 알려져 있어(Ackers 등, 1973) 조석곡선의 약간의 비대칭성이라도 창·낙조시 토사의 이동량에는 적지 않은 차이가 발생하게 된다. 또한 부유사나 부유유기물질의 이동에 있어서도 조석의 비대칭성과 이에 따른 조

*목포대학교 토목공학과(Department of Civil Engineering, Mokpo National University, Muan-Gun, Cheon Nam 534-729, Korea)

류의 비선형성(Aubrey 등, 1985)에 기인하는 해수순환 현상과 밀접한 관계가 있다고 알려져 있다. 따라서 이러한 해역에서의 유사이동 또는 오염확산 등과 관련된 제반 동수역학적 연구를 수행할 경우 천해조에 대한 면밀한 관찰과 세심한 적용이 요구된다. 본 연구에서는 창조우세 또는 낙조우세를 유발하는 이러한 천해조의 발생기구를 규명하였고, 하구의 물리적 특성에 따라 큰 차이를 보이는, 천해조를 포함한 조석파의 전파양상을 수치실험을 통해 파악하였다.

2. 조석파의 전파특성

2.1 일반적 특성

하구입구에서 상류방향으로 전파되는 조석파는 마찰이 없고 단면이 일정한 경우 진폭이 일정한 wave eq.으로 표현되며, 이때의 파속은 $(gh)^{1/2}$로서 조류속과 조위가 동일 위상을 유지하는 진행파가 된다. 완전반사가 발생되는 경우에는 배와 마디에 따라 진폭이 변하며 파속이 무한대가 되고 위상차가 90도가 되는 정상파가 형성되며, 이때 하구의 길이가 L/4이면 입구에서의 진폭은 0, 타구간에서는 공진 발생하게 된다. 그러나 실제 하구에서는 단면변화와 바닥마찰 등을 비롯한 여러 가지 요인에 의해 파의 진폭과 파속의 변화가 야기된다. 이에 관한 연구의 효시는 Green(1837)이라 할 수 있는데, 그는 단면의 변화가 완만하며 마찰을 무시할 경우 수심(h)과 하폭(b)의 변화에 따라 조석파의 진폭은 $b^{-1/2}h^{-1/4}$의 비율로 증가한다는 'Green의 법칙'을 제시하였다. 그러나 이 결과를 실제 하구에 적용시키기에는 두 가지 가정 모두 비현실적인 것이며, 특히 바닥마찰은 조석파의 전파에 있어서 결코 무시할 수 없을 정도가 아니라 몇몇 하구에서는 지배적인 역할을 하는 요소인 것이다. 따라서 후속된 여타연구에서는 바닥마찰이 포함되어 있는 수학적 모형에 대한 해석적 해를 구하는 연구가 진행되어 왔다(Dronkers, 1964; Prandle and Rahman, 1980; Parker, 1984). 마찰이 작을 경우 입사파와 반사파의 진폭은 진행방향으로 지수적으로 감소하고, 입사파와 반사파의 파속은 마찰 없는 경우에 비해 약간 작은 정도로 동일하며, 이 경우 반사파에 의한 공진을 약화시키는 경향이 있다(Ippen, 1966). 최근에는 이러한 바닥마찰 뿐 아니라 완만한 단면변화(weakly convergent)의 제한마저 극복하여 急縮(strongly convergent) 단면을 갖는 하구에서의 해석(Hunt, 1964; Jay, 1991; Friedrichs and Aubrey, 1994; Lanzoni and Seminara, 1998)도 상당히 진척된 상태이다. 그러나 이들 연구는 모두 1차원적 해석에 의한 것으로서, 낙조시 최대조류속이 창조시보다 더 크게 되는 낙조우세를 유발한다고 알려져 있는 조간대에 의한 효과(Speer 등, 1985)는 고려하지 않았다.

2.2 천해조와 조석왜곡

Brown(1973)의 연구결과를 황해에 적용시키면 황해의 조석특성에 의해 Kelvin wave의 입사파와 Poincare wave의 반사파가 황해의 동쪽 해안인 우리나라 서해안으로 집중되어(Kang, 1984), 우리나라 서해안에서 M_4 분조의 발달이 두드러지며, 남쪽에서 북쪽으로 전파되는 M_2 분조와는 달리 M_4 분조는 북쪽에서 남쪽으로 전파되는 경향을 갖게 된다(Kang *et al.*, 1998). 이와 같이 우리나라 서남해안은 황해 전반의 조석특성에 기인한 근본적인 원인에 의해 천해조가 매우 발달되어 있다. 이렇게 형성된 천해조가 하구입구에서 감조하천 상류로 전파되면서 바닥마찰과 흐름의 곡률 및 조간대의 영향 등 여러 가지 비선형 효과에 의해 점차 성장하게 된다. 반일주조가 우세한 해역에서 이러한 천해조가 함께 작용될 경우 창조시간과 낙조시간에 차이가 발생하는 조석곡선의 비대칭성이 유발될 수 있는데, 천해조와 그 모체가 되는 천문조 간의 상대적인 위상차에 따라 낙조시간이 창조시간보다 긴 경우 최강창조류가 최강낙조류보다 크게 되어 창조우세(flood dominant)가 형성되고 반대의 경우 낙조우세(ebb dominant)가 형성된다.

강주환(2000)은 전술한 황해에서의 조석특성에 따라 조석비대칭 현상이 해역별로 구분되는 특성, 즉 군산해역은 창조우세, 목포해역은 낙조우세의 개략적인 특성을 보이며, 각 해역 입구에서 형성된 창낙조우세가 감조하천의 상류로 갈수록 천해조가 성장하므로 각각의 우세가 더욱 심화된다는 연구결과를 제시한 바 있다. 또한 조간대가 발달되고 수심이 깊은 하구는 낙조우세화하는 경향이 있다는 연구결과(Speer 등, 1985)에 따라서도 조간대가 매우 발달되어 있는 목포해역은 낙조우세, 그렇지 않은 군산해역은 창조우세의 근거를 찾을 수 있다.

3. 국내하구에서의 전파특성

3.1 표준모형 설정

이렇듯이 목포해역과 군산해역에 각각 위치하고 있는 영산강하구와 금강하구는 하구의 특성이 확연히 구분되

고 있다. 전자는 수심이 깊고 조간대의 발달이 두드러져 낙조우세를 보이며 에너지 소산이 비교적 적은 반면에 후자는 수심이 얕아 에너지 소산이 크며 창조우세를 보이고 있다. Lanzoni와 Seminara(1998)에 의한 하구의 수렴도와 바닥마찰의 정도에 따른 하구분류에 따르면 영산강하구는 WDMC(weakly dissipative and moderately convergent)에 해당하고 금강하구는 SDMC (strongly dissipatjve and moderately convergent)에 해당된다. 또한 목포해역에 위치하고 있으며 영산강 종합개발 계획중 4단계에 해당하는 무안만의 경우 WDWC (weakly dissipative and weakly convergent)에 해당되고 한강하구는 SDWC(strongly dissipative and weakly convergent)에 해당되는 것으로 추정되는 등 국내에는 4가지 하구분류 각각에 해당되는 모든 형태의 하구가 존재하고 있다. 본 연구에서는 이 중 영산강하구와 금강하구를 택하여 표준모형으로 선정하였으며, 그 개략적인 제원은 Table 1과 같다. 표준모형에서는 실제 감조하천의 선형과 길이방향 각 단면의 정확한 폭과 수심은 고려하지 않고 전체 길이와 폭과 수심의 선형적 변화만을 감안한 것이다. 또한 조간대의 영향을 분석하기 위해 영산강하구의 경우 표준모형에서는 조간대를 무시하였다.

Table 1. Physical properties of simplified YRE and KRE

		YRE	KRE
Mouth	Width B (m)	1300	1800
	Depth h (m)	24	8
Head	Width B' (m)	260	400
	Depth h' (m)	2	1
Length L (km)		62	60
Manning's n		0.028	0.028
Slope ((h–h')/L)		0.00035	0.00012
Convergence (B–B')/2L		0.008	0.010

3.2 수치실험

영산강과 금강모형의 하구입구에 진폭이 각각 1.5 m, 2 m의 가상적인 M_2 분조가 유입될 경우 감조하천 상류로 전파되는 조석파의 거동을 분석하기 위해 각각의 표준모형에 대한 수치실험, 영산강 표준모형에 조간대를 추가한 수치실험과 각각의 모형에 천해조를 경계조건에 포함시킨 경우의 수치실험을 실시하였다. 격자간격은 흐름방향(x방향) 200 m, 폭방향(y방향) 100 m이며, 시간간격은 20초이다. 영역내부에서 발생하고 성장하는 천해조인 M_4 분조를 추출하기 위하여 조화분석을 시행하였으며, 상기 조건에 따른 각 지점에서의 결과를 Table 2에 수록하였다. 이를 보면 영산강에서 M_2 분조와 M_4 분조 모두 상류로 갈수록 증폭되고 있으며, 특히 수심이 작은 금강에서의 M_4 분조가 눈에 띄게 성장하고 있음을 알 수 있다. 이에 따라 상류 지점에서는 진폭비가 0.25에 달하여 낙조시간이 8시간을 초과하는 심한 창조우세를 보이고 있다.

또한 조석왜곡 현상에 있어 조간대의 효과를 검토하기 위해 영산강하구의 표준모형에 조간대를 추가한 결과를 Table 3에 제시하였다. 이를 보면 낙조시간이 표준모형에서와 상반된 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 즉, 상류로 갈수록 천해조의 성장이 두드러지고 있어 낙조시간도 상류로 갈수록 작아지는 낙조우세 현상을 보이고 있다.

한편 1장에서 언급한 바와 같이 실제 영산강 하구와 금강 하구는 각각 낙조우세와 창조우세를 보이고 있으며, 상류로 갈수록 각각의 우세가 심화된다고 하였는데,

Table 2. Results of numerical simulations at simplified YRE and KRE

Locality		M_2 constituent		M_4 constituent		amplitude ratio	relative phase (°)	ebbing time (hr)
		ampl.(m)	phase(°)	ampl.(m)	phase(°)			
KRE	0.0 L	1.951	273.0	0.000	329.7	0.000	216.2	6.21
	0.2 L	1.792	288.8	0.091	140.5	0.051	77.1	6.60
	0.4 L	1.622	306.8	0.165	179.5	0.102	74.1	6.99
	0.6 L	1.402	328.3	0.225	226.2	0.161	70.5	7.41
	0.8 L	1.101	353.6	0.271	281.7	0.247	65.5	7.98
YRE	0.0 L	1.463	273.0	0.000	27.4	0.000	158.5	6.21
	0.2 L	1.529	274.1	0.004	286.4	0.003	261.9	6.19
	0.4 L	1.597	275.7	0.010	295.1	0.007	256.3	6.16
	0.6 L	1.664	278.1	0.018	309.8	0.011	246.5	6.13
	0.8 L	1.700	283.0	0.024	349.5	0.014	216.5	6.13

Table 3. Result of numeridal simulation with tidal flat at YRE

Locality		M_2 constituent		M_4 constituent		amplitude ratio	relative phase (°)	ebbing time (hr)
		ampl.(m)	phase(°)	ampl.(m)	phase(°)			
YRE	0.0 L	1.463	273.0	0.000	27.4	0.000	158.5	6.21
	0.2 L	1.552	276.6	0.077	289.4	0.050	263.9	5.82
	0.4 L	1.640	281.4	0.173	305.0	0.106	257.9	5.39
	0.6 L	1.712	289.4	0.286	327.7	0.167	251.1	4.96
	0.8 L	1.675	305.8	0.360	6.0	0.215	245.7	4.66

Table 4. Result of numeridal simulation with M_4 boundary conditions

Locality		M_2 constituent		M_4 constituent		amplitude ratio	relative phase (°)	ebbing time (hr)
		ampl.(m)	phase(°)	ampl.(m)	phase(°)			
KRE	0.0 L	1.952	273.0	0.097	95.8	0.050	90.1	6.60
	0.2 L	1.797	288.4	0.166	134.3	0.093	82.4	6.94
	0.4 L	1.628	306.2	0.223	174.8	0.138	77.6	7.27
	0.6 L	1.403	327.5	0.267	222.2	0.191	72.9	7.65
	0.8 L	1.098	352.7	0.296	279.0	0.270	66.5	8.17
YRE	0.0 L	1.463	273.0	0.193	276.0	0.132	270.0	5.16
	0.2 L	1.539	277.2	0.412	292.2	0.191	262.7	4.71
	0.4 L	1.613	282.5	0.412	309.4	0.256	255.7	4.25
	0.6 L	1.660	292.1	0.524	332.9	332.9	251.4	3.84
	0.8 L	1.527	312.0	0.526	10.5	0.345	253.6	3.60

이를 확인하기 위하여 하구 입구에 천해조를 경계조건에 포함시킨 경우에 대한 수치해석을 실시하였다. 그 결과를 Table 4에 제시하였는데 천해조를 경계조건으로 부여치 않은 경우에 비해 각각의 낙조우세와 창조우세가 더욱 심화됨을 보이고 있다. 그러므로 천해조가 크게 작용하는 하구에서의 수치해석시 경계조건에 천해조를 포함시키는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서 실시한 수치실험 결과를 영산강과 금강으로 구분하여 각각의 M_2, M_4 분조의 진폭을 각 지점별로 Fig. 1에 도식하였다. 그림에서 보듯이 영산강의 경우 표준모형에 비하여 조간대를 추가한 수치실험의 결과에서 M_4 분조의 진폭이 크게 성장하고 있음을 보이고 있으며 Fig. 2와 같이 낙조우세가 더욱 심화되었다. 즉 영산강 하구에서의 낙조우세는 조간대의 영향에 크게 기인하고 있음을 알 수 있다. 또한 앞에서 언급한 바와 같이 Fig. 2를 보면 각각의 모형에 천해조를 경계

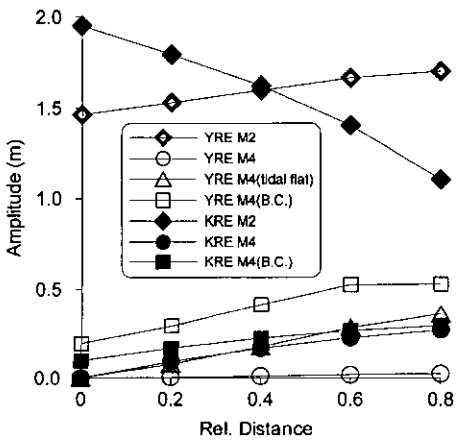

Fig. 1. Amplitudes of M_2 and M_4 at YRE and KRE.

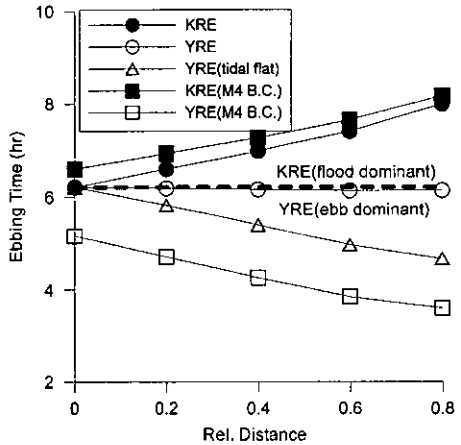

Fig. 2. Ebbing times of each simulation.

조건으로 부여한 경우에 상류로 갈수록 영산강은 낙조우세가, 금강은 창조우세가 더욱 심화됨을 보이고 있다.

4. 결 론

서로 지형적 특성이 다른 영산강하구와 금강하구에 대한 조석파 전파에 관한 수치실험 결과 기존 해석적 연구결과를 재확인 할 수 있었으며, 특히 영산강하구의 전반적 낙조우세 경향이 황해의 조류특성에 따른 하구입구의 낙조우세가 상류로 갈수록 조간대에 기인한 천해조 발달로 인해 점차 심화되는 것으로 나타났다. 또한 천해조가 발달된 해역에서 유사이동이나 오염확산 등과 관련된 수치해석적 연구시 외해경계조건으로 천해조를 포함시키는 것이 매우 중요하다는 연구결과도 도출할 수 있었다.

참고문헌

강주환, 2000. 우리나라 서남해역의 창·낙조우세와 황해에서의 조류타원도의 회전. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, **20**(II-2), pp. 269-276.

강주환, 송재준, 오남선, 1998. 낙조우세와 관련된 목포해역의 조류특성 분석. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, **18**(II-2), pp. 185-193.

Ackers, P. and White, W. R., 1973. Sediment Transport: New Approach and Analysis, *J. of the Hydraulics Division, ASCE*, **99**(HY11), pp. 2041-2060.

Aubrey, D.G. and Speer, P.E., 1985. A study of nonlinear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems. Part I: observations. Estuarine, *Coastal and Shelf Science*, **21**, pp. 185-205.

Brown, P. J., 1973. Kelvin-wave reflection in a semi-infinite canal, *J. of Marine Research*, **31**, pp. 1-10.

Dronkers, J. J., 1964. Tidal Computations in Rivers and Coastal Waters, North-Holland, New York, pp.518.

Friedrichs, C. T. and D. G. Aubrey., 1994. Tidal Propagation in Strongly Convergent Channels, *J. of Geophysical Research*, **99**(C2), pp. 3321-3336.

Green, G., 1837. On the Motion of Waves in a Variable Canal of Small Depth and Width, Trans. Cambridge Philos. Soc., **6**, pp. 457-462.

Hunt, J. N. 1964. Tidal Oscillations in Estuaries, Geophys. *J. R. Astron. Soc.*, **8**, pp. 440-455.

Ippen, A. T., 1966. Tidal Dynamics in Estuaries, I: Estuaries of Rectangular Section, in Estuary and Coastline Hydrodynamics, edited by A. T. Ippen, McGraw-Hill, New York, pp. 493-522.

Jay, D. A., 1991. Green's Law Revisited: Tidal Long-Wave Propagation in Channels with Strong Topography, *J. of Geophysical Research*, **96**(C20), pp. 20585-20598.

Kang, J. W., 1999. Changes in tidal characteristics as the result of the construction of sea-dike/seawalls in the Mokpo coastal zone in Korea, Estuarine, *Coastal and Shelf Science*, **37**, pp. 429-438.

Kang, S. K., Lee, S. R. and Lie, H. J., 1998. Fine grid tidal modeling of the Yellow and East China Seas, *Continental Shelf Research*, **18**, pp. 739-772.